

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки 14.03.02 Ядерные физика и технологии

Отделение школы Отделение ядерно-топливного цикла

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы	
Моделирование взаимодействия гамма-квантов с энергиями 10-100 кэВ при прохождении через pin-диод	

УДК 539.122.17.001.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А4А	Серикбекова Зарина Канаткызы		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Инженер ОЯТЦ	Тургунова Н.Д.			

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОГСН	Меньшикова Е.В.	к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ	Т.С. Гоголева	к.ф.-м.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ядерные физика и технологии	Бычков П.Н.	к.т.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Общекультурные компетенции	
Р1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.
Р2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.
Р3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления.
Р4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы; осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности.
Р5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
Р6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Профессиональные компетенции	
Р7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
Р8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).
Р9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
Р10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
P11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.
P12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов.
P14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа ядерных технологий

Направление подготовки (специальность) 14.03.02 Ядерные физика и технологии

Уровень образования высшее

Отделение школы (НОЦ) ядерно-топливного цикла

Период выполнения (осенний / весенний семестр 2017/2018 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврская работа
(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	13.06.2018
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
	<i>Составление и утверждение технического задания</i>	2
	<i>Подбор и изучение материалов по теме</i>	2
	<i>Выбор направления исследования</i>	2
30.04.2018	<i>Моделирование p-n-диода в компьютерной программе GEANT4.</i>	8
08.05.2018	<i>Расчет энергетических спектров.</i>	7
15.05.2018	<i>Определение эффективности.</i>	7
26.05.2018	<i>Анализ и описание результатов</i>	6
04.06.2018	<i>Подготовка к защите ВКР</i>	6

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Инженер ОЯТЦ	Тургунова Н.Д.			

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ядерные физика и технологии	Бычков П.Н.	к.т.н.		

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки 14.03.02 Ядерная физика и технологии

Отделение школы Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

_____ 23.04.2018 Бычков П.Н.
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврская работа
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
0А4А	Серикбекова Зарина Канаткызы

Тема работы:

Утверждена приказом директора (дата, номер)	№2199/с от 28.03.2018 г.
---	--------------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Смоделировать pin-диод в компьютерной программе GEANT4.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ul style="list-style-type: none">- Литературный обзор по теме исследования;- Разработка модели PIN –диода;- Смоделировать спектры для различных источников излучения;- Рассчитать эффективность модели PIN – диода;- Анализ полученных результатов.
Перечень графического материала	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Меньшикова Е.В.
Социальная ответственность	Гоголева Т.С.

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском языке:
Введение
Обзор литературы
PIN-диод
Моделирование PIN-диода
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение
Социальная ответственность

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Инженер ОЯТЦ	Тургунова Н.Д.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A4A	Серикбекова Зарина Канаткызы		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А4А	Серикбекова Зарина Канаткызы

Школа	ИЯТШ	Отделение	ОЯТЦ
Уровень образования	Бакалавр	Направление	14.03.02 Ядерные физика и технологии

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	– Накладные расходы – 4330 руб.; – Заработная плата – 24815,41 руб.; – Отчисления во внебюджетные фонды – 6724,97 руб.; – Бюджет затрат – 35870,38 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Тариф на электроэнергию – 5,8 руб. за 1 кВт·ч.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 32 %.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Сравнение конкурентных технических решений
2. Разработка устава научно-технического проекта	– SWOT-анализа; – Планирование научно-исследовательских работ; – Разработка графика проведения научного исследования (диаграмма Ганта).
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Бюджет научно – технического исследования: – расчет материальных затрат; – расчет основной и дополнительной; – заработной платы исполнителей темы; – отчисления на социальные нужды; – накладные расходы; – формирование бюджета затрат.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НТИ
2. Оценка конкурентоспособности технических решений
3. Матрица SWOT
4. График проведения и бюджет НТИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОГСН	Меньшикова Е.В.	доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А4А	Серикбекова Зарина Канаткызы		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А4А	Серикбекова Зарина Канаткызы

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ЯТЦ
Уровень образования	Бакалавр	Направление	14.03.02 Ядерные физика и технологии

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:	<ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации, ионизирующее излучение); – опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	<ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность; – пожаровзрывобезопасность; – требования охраны труда при работе на ПЭВМ;

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	<ul style="list-style-type: none"> – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:	<ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ	Т.С. Гоголева	К.ф.-М.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А4А	Серикбекова Зарина Канаткызы		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит: 84 страницы, 22 рисунков, 13 таблиц, 18 источников, 4 приложения.

Ключевые слова: p_{in}-диод, моделирование, взаимодействие веществ, GEANT4, метод Монте-Карло. Объектом исследования является p_{in}-диод.

Целью данной работы является исследование возможности применения p_{in}-диода в качестве детектора для спектрометрического анализа

В процессе работы в компьютерной программе GEANT4 была разработана модель p_{in}-диода. В разработанной модели были получены спектры для различных источников и рассчитана эффективность диода.

В результате исследования была разработана программа для моделирования p_{in}-диода. Исследования показали, что эффективность регистрации диода с ростом энергии уменьшается. Основное преимущество p_{in}-диодов, для целей спектрометрии помимо их дешевизны, так же является их малый размер. Детекторы, на основе таких диодов, стоит применять при измерениях в низком диапазоне энергий, до 100 кэВ.

Область применения: спектрометрия, дозиметрия, ядерная медицина, ядерная физика.

Бакалаврская работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2010 с применением пакетов Microsoft Excel 2010 и GEANT4.

Содержание

Обозначения и сокращения.....	13
Введение.....	14
1 Обзор литературы	15
1.1 Взаимодействие фотонов с веществом.....	15
1.1.1 Фотоэффект	16
1.1.2 Эффект Комптона	18
1.1.2 Образование электрон – позитронных пар.	19
1.1.4 Тормозное излучение.....	20
1.1.5 Многократное рассеяние.....	21
1.1.6 Аннигиляция.....	22
1.2 Метод Монте-Карло	23
1.2.1 FLUKA	24
1.2.2 MCNP	24
1.2.3 GEANT4	24
2 Pin-диод.....	27
2.1 Рабочие параметры pin-диода.....	29
2.2 P-i-n-диод марки «BPW-34».....	30
3 Моделирование PIN – диода.....	32
3.1 Описание основных составляющих параметров.	32
3.1.1 Создание геометрии модели	33
3.1.2 Физические процессы.....	35
3.1.3 Первичные частицы	36
3.2 Анализ результатов моделирования	38
3.2.1 Энергетические спектры	38

3.2.2 Сравнение спектров	41
3.2.3 Эффективность регистрации	43
Заключение	44
Список использованных источников	45
Приложение А	47
Приложение Б.....	48
Приложение В	53
Приложение Д	58

Обозначения и сокращения

эВ – электрона-вольт;

МэВ – мегаэлектрон-вольт;

кэВ – киллоэлектрон-вольт;

GPS – GeneralParticleSource.

Введение

На текущий момент оборудование для рентгеновской и гамма – спектрометрии далеко не всегда является транспортируемым и стоит существенных денежных средств, поэтому вопрос о поисках более эффективных методов регистрации излучения остаётся открытым.

PIN – диоды являются доступными, дешевыми и обладают малыми размерами. И фактически, они являются полупроводниковыми детекторами. Исследование возможности применения PIN на данный момент является актуальным, так как их применение, потенциально, может уменьшить стоимость и увеличить доступность оборудования для спектрометрии, радиационной безопасности.

Цель работы: исследовать возможность применения pin-диода в качестве детектора для спектрометрического анализа.

Задачи:

- Литературный обзор по теме исследования;
- Разработка модели PIN – диода;
- Смоделировать спектры для различных источников излучения;
- Рассчитать эффективность модели PIN – диода;
- Анализ полученных результатов.

1 Обзор литературы

1.1 Взаимодействие фотонов с веществом.

При прохождении пучков фотонов через вещество передача энергии происходит в результате следующих процессов: упругого рассеяния, фотоэффекта, комптон-эффекта (комптоновского рассеяния), рождения электрон-позитронных пар и фотоядерных реакций. Под действием первых трех механизмов образуются вторичные фотоны и электроны, (при рождении пар еще и позитроны) в результате среда ионизируется. При фотоядерных реакциях образуются тяжелые частицы, как заряженные (протоны, дейтроны, альфа-частицы и т.д.) частицы, так и незаряженные. В результате любых процессов могут образовываться вторичные фотоны. Соотношение роли механизмов взаимодействия фотонов с веществом меняется с изменением энергии фотонов[1]

Из характера зависимости сечений от энергии γ -излучения E_γ и заряда среды Z следует, что в области малых энергий основной механизм взаимодействия γ -излучения со средой – фотоэффект, в промежуточной области – эффект Комптона, а в области больших энергий ($E_\gamma > E_2$) – процесс образования электрон-позитронных пар. Граничные значения энергии, отделяющие области преимущественного значения каждого из эффектов, зависит от атомного состава среды. На рис. 1 представлена энергетическая зависимость вероятности различных видов процессов взаимодействия фотонов, как функция энергии первичных фотонов [1].

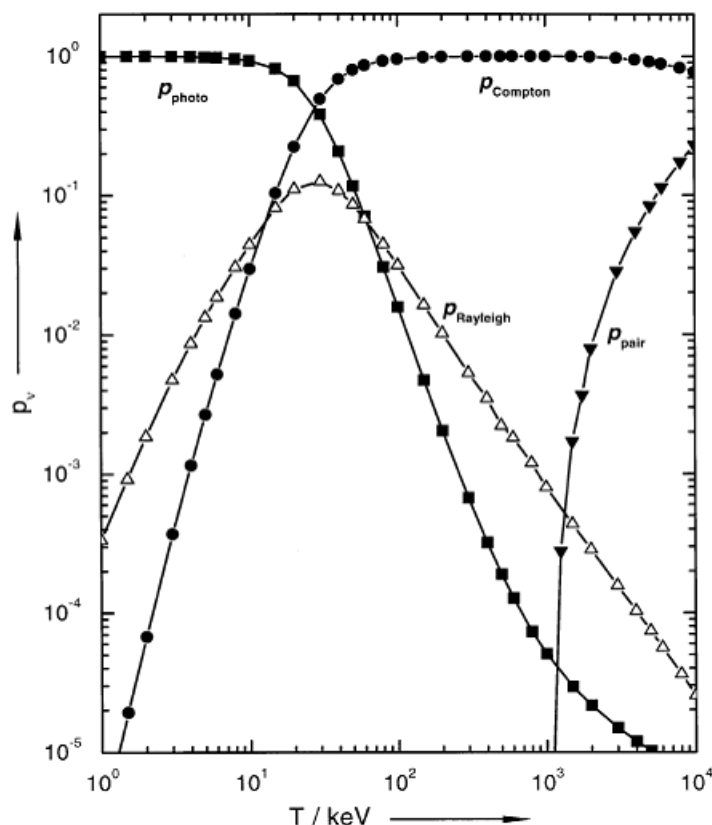


Рисунок 1 – Энергетическая зависимость вероятности p_v различных видов процессов взаимодействия фотонов (p_{photo} – вероятность фотоэффект, $p_{compton}$ – вероятность комптон-эффекта, p_{pair} – вероятность образования электрон-позитронных пар, $p_{rayleigh}$ – вероятность рэлеевского рассеяния.)

1.1.1 Фотоэффект

Фотоэффектом – называется явление высвобождения электронов с поверхности тела под действием электромагнитного излучения.

Освободившееся в результате фотоэффекта место на электронной оболочке заполняется электронами с вышерасположенных оболочек. Этот процесс сопровождается испусканием рентгеновского излучения или испусканием электронов Оже (непосредственная передача энергии возбуждения атома электрону этого же атома - процесс, аналогичный явлению внутренней конверсии). Для фотоэффекта весьма существенна связь электрона с атомом, которому передается часть энергии фотона. Чем меньше связь электрона с атомом по сравнению с энергией фотона, тем менее

вероятен фотоэффект. Это обстоятельство определяет все основные свойства фотоэффекта: ход сечения с энергией, соотношение вероятностей фотоэффекта на разных электронных оболочках и зависимость сечения от заряда среды. На рисунке 2 показана зависимость сечения фотоэффекта от энергии γ – квантов.[14]

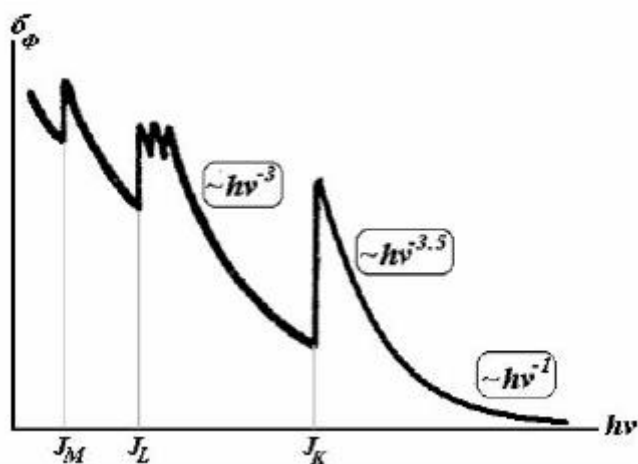


Рисунок 2 – Зависимость эффективного сечения фотоэффекта от энергии фотонов

По мере убывания $h\nu$, т.е. возрастания связности электронов $J_k/h\nu$, сечение процесса быстро растет до тех пор, пока энергия фотона не станет равной энергии J_k . При $h\nu < J_k$ фотоэффект на К-оболочке атома станет невозможным, сечение фотоэффекта будет определяться только взаимодействием фотонов с электронами L , M и др. оболочек. Но электроны этих оболочек связаны с атомами слабее, чем электроны К-оболочки. Поэтому при равных энергиях γ - квантов вероятность фотоэффекта электрона с L -оболочки (а тем более с M -оболочки) существенно меньше, чем с K -оболочки. В связи с этим при $h\nu = J_k$ на кривой сечения наблюдается резкий скачок. При $h\nu < J_k$ сечение фотоэффекта снова начинает расти, так как опять возрастает относительная связанность электрона $J_L/h\nu$. Рост прекращается при $h\nu = J_L$, где наблюдается новый резкий скачок сечения, и т.д. [1].

Таким образом, для сечения фотоэффекта получается следующая зависимость от энергии γ - излучения и заряда среды:

$$\sigma_{\text{ф}} \sim \frac{Z^5}{h\nu} \text{ для } h\nu \gg J_{\text{к}};$$

$$\sigma_{\text{ф}} \sim \frac{Z^5}{h\nu^{-3,5}} \text{ для } h\nu > J_{\text{к}}. \quad (1)$$

1.1.2 Эффект Комптона []

Эффект Комптона – упругое рассеяние электромагнитного излучения на свободных электронах, сопровождающееся увеличением длины волны; наблюдается при рассеянии излучения малых длин волн — рентгеновского и гамма-излучения[15].

Рассеиваясь на покоящемся электроне, фотон передаёт ему часть своей энергии и импульса и меняет направление своего движения. Электрон в результате рассеяния начинает двигаться. Фотон после рассеяния будет иметь энергию $E' = h\nu'$ (и частоту) меньшую, чем его энергия (и частота) до рассеяния. Соответственно после рассеяния длина волны фотона λ' увеличится. Из законов сохранения энергии и импульса следует, что длина волны фотона после рассеяния увеличится на величину:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta), \quad (2)$$

где θ – угол рассеяния фотона;

m_e – масса электрона $h/m_e c = 0,024 \text{ \AA}$ называется комптоновской длиной волны электрона.

Изменение длины волны при комптоновском рассеянии не зависит от λ и определяется лишь углом θ рассеяния γ -кванта. Кинетическая энергия электрона определяется соотношением

$$E_e = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{m_e c^2}{2E_{\gamma} \sin^2 \frac{\theta}{2}}}. \quad (3)$$

Эффективное сечение рассеяния γ -кванта на электроне не зависит от характеристик вещества поглотителя. Эффективное сечение этого же процесса, рассчитанное на один атом, пропорционально атомному номеру

(или числу электронов в атоме) Z . Сечение комптоновского рассеяния убывает с ростом энергии γ -кванта: $\sigma_k \sim 1/E_\gamma$.

1.1.2 Образование электрон – позитронных пар.

При достаточно высокой энергии γ -кванта наряду с фотоэффектом и эффектом Комптона может происходить третий вид взаимодействия γ -квантов с веществом – образование электрон-позитронных пар. Процесс образования ($e^+ - e^-$) требует обязательного соседства ядра или электронов, так как в этом случае можно распределить энергию и импульс γ -кванта между тремя частицами без противоречия с законами сохранения. При этом если процесс образования пары идет в кулоновском поле ядра или протона, то энергия образующегося ядра отдачи оказывается весьма малой, так что пороговая энергия γ -кванта E_0 , необходимая для образования пары, практически совпадает с удвоенной массой покоя электрона: $E_0 \approx 2m_e c^2 = 1,02$ MeV и кроме e^+ и e^- летят (в начале своего пути) в направлении вызвавшего их γ -кванта под углом $\theta \approx m_e c^2 / h\nu$ к нему. Пороговая энергия фотона для образования пары в поле электрона равна $4m_e c^2 = 2.044$ МэВ [1].

Теоретические расчеты зависимости сечения рождения пар от энергии γ -квантов приводят к довольно сложному виду. Однако для области энергий $5m_e c^2 < h\nu < 50m_e c^2$ эта зависимость может быть представлена в виде:

$$\sigma_{\Pi} \sim Z^2 \ln = \frac{h\nu}{m_e c^2}. \quad (4)$$

При энергии фотонов $h\nu < 5m_e c^2$ и $h\nu > 50m_e c^2$ сечение растет медленнее. При $h\nu > 50m_e c^2$ рост сечения ограничивается экранированием кулоновского поля ядра атомными электронами. В предельно релятивистском случае при $h\nu > 10^3 m_e c^2$ сечение не зависит от энергии:

$$\sigma_{\Pi} \sim 0,08 Z^2 r_e^2 = 0.63 \cdot 10^{-26} \cdot Z^2 \text{ см}^2. \quad (5)$$

1.1.4 Тормозное излучение

При движении заряженной частицы в веществе происходит её рассеяние в электростатических полях атомных ядер и электронов. Возникающее в результате тормозное излучение пропорционально квадрату ускорения a частицы

$$E_e = \frac{2e^2 a^2}{3c^2}, \quad (6)$$

где E - энергия, излучаемая зарядом e , c - скорость света. Тормозное излучение, как правило, возникает при движении электронов в среде. Оно лежит в основе рентгеновского излучения рентгеновских аппаратов и γ -излучения, испускаемого быстрыми электронами при прохождении через вещество. Так как ускорение обратно пропорционально массе частицы, то тормозное излучение электрона будет в тысячи раз интенсивнее тормозного излучения протона. Число тормозных фотонов с энергией между $\hbar\omega$ и $\hbar(\omega + d\omega)$, испущенных электроном движущимся в поле ядра с зарядом Ze , пропорционально Z^2/ω [18].

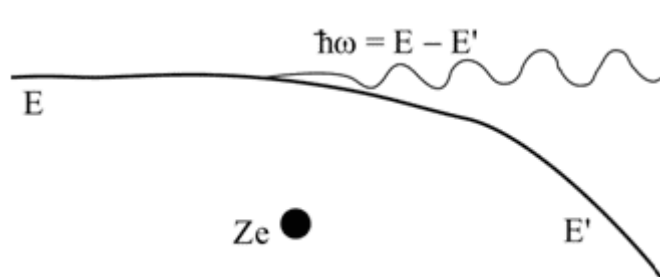
$$N(\omega)d\omega = \frac{Z^2 d\omega}{\omega}. \quad (7)$$


Рисунок 3 – тормозное излучение электрона в кулоновском поле ядра Ze

Расстояние, на котором энергия электрона E из-за тормозного излучения уменьшается в e раз, называется радиационной длиной χ_0 . Спектр энергии тормозного излучения непрерывный и имеет верхнюю границу, равную начальной энергии электрона. При релятивистских энергиях электрона $T_e \gg m_e c^2$ тормозное излучение электронов направлено по направлению их движения и концентрируется в пределах конуса с угловым раствором

$$\theta(\text{рад}) = \frac{m_e c^2}{T_e}. \quad (8)$$

На этом основано получение интенсивных пучков высокоэнергичных γ -квантов на электронных ускорителях.



Рисунок 4 – Спектр тормозного излучения электронов.

1.1.5 Многократное рассеяние

Угол рассеяния в единичном акте рассеяния:

$$\text{tg} \theta \approx \frac{\Delta p}{p} = \frac{2Zze^2}{pv} \frac{1}{b}. \quad (9)$$

Отсюда для среднего квадрата угла многократного рассеяния на пути x в веществе с плотностью ядер n :

$$\langle \theta^2 \rangle = \frac{8\pi Z^2 z^2 e^4 n x}{(pv)^2} \ln \frac{b_{\max}}{b_{\min}}. \quad (10)$$

Если выбрать для оценки в качестве ρ_{\max} и ρ_{\min} размеры атома и ядра, то эта формула приобретает вид:

$$\langle \theta^2 \rangle = 0,157 \frac{Z(Z+1)}{A} \cdot \frac{z^2 x}{(pv)^2} \ln \left[1,13 \cdot 10^4 \cdot \frac{Z^{4/3}}{A} \cdot \frac{z^2 x}{\beta^2} \right], \quad (11)$$

где A – атомная масса вещества в а.е.м.,

pv – в МэВ,

x – в см.

Логарифм является слабо меняющейся функцией, так что основную роль играет множитель, стоящий перед ним.

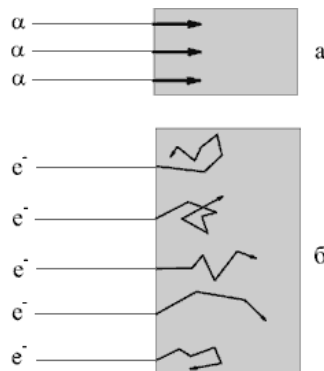


Рисунок 5 – Схематическое представление поведения траекторий первоначально параллельного пучка нерелятивистских частиц в веществе. а – альфа-частицы, б – электроны

Для тяжёлой нерелятивистской заряженной частицы $p = mv$ и, ввиду большой величины её массы m и малости пробега x , средний угол рассеяния невелик, и траектория практически прямолинейна (рис. 5а).

1.1.6 Аннигиляция

Аннигиляция – это процесс, в котором частица и соответствующая ей античастица превращаются в кванты электромагнитного поля или в другие частицы – кванты физических полей другой природы. Характер продуктов аннигиляции и соотношение вероятностей различных каналов аннигиляции определяются типом взаимодействия и правилами отбора, вытекающими из закона сохранения. Например, при соударении электрона и позитрона они оба могут исчезнуть, образовав несколько фотонов:

Поскольку импульсы e^- и e^+ близки к нулю, то суммарный импульс системы равен нулю, и, следовательно, образовавшиеся при аннигиляции фотоны летят в противоположные стороны, и каждый из них забирает половину энергии системы, т.е. по 0,511 МэВ. Если спины e^- и e^+ оказались параллельными, то их суммарный спин равен $1\hbar$. В этом случае возможно образование нечетного числа фотонов, вероятнее всего - трех, так как один фотон возникнуть не может из-за невыполнения закона сохранения импульса. Вероятность трехфотонной аннигиляции $\sim \alpha^3$ т.е. существенно

меньше, чем двухфотонной. В среднем трехфотонная аннигиляция осуществляется в (0,2-0,3) % случаев.

Если аннигиляция происходит "на лету", т.е. в случае, когда позитрон еще не потерял скорость, то фотоны разлетаются под углом, преимущественно "вперед" и "назад" относительно направления движения позитрона. Тот фотон, который летит "вперед", уносит большую часть энергии позитрона. Тот, который летит "назад", уносит минимальную энергию, т.е. 0,511 МэВ. Поэтому при прохождении быстрых позитронов через вещество образуется пучок γ -квантов, летящих в одном направлении, что используется для получения монохроматических пучков γ -квантов.

Позитрон - стабильная частица, в вакууме она существует бесконечно долго, но в веществе позитрон очень быстро аннигилирует. Среднее время жизни позитрона в твердых веществах к процессу аннигиляции составляет $\tau \sim 10^{-10}$ с а в воздухе при нормальных условиях $\tau \sim 10^{-5}$ с.

1.2 Метод Монте-Карло

Наиболее подходящим методом для изучения процесса переноса излучения через вещество является метод Монте - Карло. Это специальный метод изучения поведения заданной статистики при проведении многократных повторных выборок, существенно использующий вычислительные возможности современных компьютеров. При проведении анализа по методу Монте-Карло компьютер использует процедуру генерации псевдослучайных чисел для имитации данных из изучаемой генеральной совокупности. После большого числа повторений, сохраненные результаты хорошо имитируют реальное распределение выборочной статистики. Метод Монте-Карло позволяет получить информацию о выборочном распределении в случаях, когда обычная теория выборочных распределений оказывается бессильной [3].

В настоящее время существует большое количество программ расчёта дозового распределения, основанных на методе Монте-Карло. Наиболее известные из них GEANT4, FLUKA, MCNP

1.2.1 FLUKA

FLUKA – первоначально разрабатывалась для расчета защиты в проекте SPS в ЦЕРН (1962-1978). В настоящее время универсальная программа расчета взаимодействия частиц с веществом. Написана на языке Фортран. Хорошее моделирование адронных ливней. Недостатки:

- Сложность описания геометрии;
- Лицензионные ограничения.

1.2.2 MCNP

Monte-Carlo N-particle transport code – разработана в Лос-Аламосе для расчета реакторов. В настоящее время универсальная программа расчета взаимодействия частиц с веществом. Написана на языке Фортран. Хорошее моделирование нейтронных процессов, и процессов при низких энергиях.

Недостатки:

- Оригинальный подход к описанию геометрии;
- Лицензионные и экспортные ограничения.

1.2.3 GEANT4

Инструментарий GEANT4 – это код общего назначения, разработанный для приложений физики частиц, описывающих взаимодействия частиц с веществом. Он способен моделировать перенос многих типов частиц и ранее использовался для различных применений в физике радиотерапии, физике высоких энергий и радиационной защите в космосе [4]. Он обеспечивает базовую функциональность моделирования для

описания геометрии и материалов детектора, переноса импульса частиц, описания реакции детектора и визуализации имитационной экспериментальной установки и треков частиц. Он также предоставляет обширный набор физических моделей для описания взаимодействия частиц с веществом в широком диапазоне энергий [5]. Используя объектно-ориентированную технологию и язык C++, был создан гибкий и расширяемый инструментарий моделирования.

GEANT 4 представляет собой набор библиотек классов, позволяющих описать следующие аспекты компьютерного моделирования:

1. Тип и свойства используемых частиц. Например, класс `G4ParticleDefinition` позволяет задать такие свойства частицы как масса, спин, моды распада и т.д., а с помощью класса `G4DynamicParticle` возможно реализовать такие динамические характеристики частиц, как энергия, момент количества движения, поляризация и т.д. [6].

2. Генерация первичных частиц. За создание первичных частиц отвечает класс `G4PrimaryGeneratorAction`, в котором существует возможность задавать тип, свойства, а также форму пучка.

3. Физические процессы, обуславливающие взаимодействие частиц. За данный аспект отвечает класс `G4PhysicsList`. В нем создаются все частицы, а также процессы, которые могут с ними происходить. Так как создание такого пакета является очень сложной процедурой, где нужно учитывать массу деталей, то обычно используют готовые пакеты, специализированные для определенных целей [7].

4. Получение информации о каждом событии, треках и ее хранение. Класс `G4Event` содержит информацию о каждом событии в процессе моделирования. Класс `G4Step` позволяет получить информацию о каждом шаге моделирования.

5. Интерфейсные команды. Geant4 имеет различные встроенные команды пользовательского интерфейса. Эти команды могут использоваться интерактивно через пользовательский интерфейс (GUI) или в пакетном

режиме в макрокоманде. Пользовательские команды могут быть реализованы в пользовательских классах, наследуя поведение из базового класса G4UIMessenger, который представляет собой мессенджер, который доставляет эти команды объекту класса. Эти команды особенно полезны, когда параметры геометрии, первичного луча или физики должны быть изменены между имитациями. Таким образом, можно выполнить несколько симуляций с использованием макрофайла, содержащего ряд подходящих команд, для изменения экспериментальной настройки ad hoc.

6. Визуализация. Geant4 имеет возможность визуализировать компоненты детекторов, траектории частиц и этапы отслеживания и удары частиц в компонентах детектора.

2 Pin-диод.

Pin-диод – это приемник оптического излучения, имеющий полупроводниковую структуру, которая включает в себя область положительных зарядов (p), область отрицательных зарядов (n), и разделяющую их нейтральную область (i), обедненную носителями заряда (рисунок 6). [17]

Фотоны вводятся в детектор через окошко, имеющее тонкий слой проводящего покрытия. В базе и коллекторе повышена концентрация носителей зарядов. В слое поглощения может создаваться некоторый примесный фон.

Когда фотон попадает в обедненную область, там образуются электронно-дырочные пары. Под действием электрического поля они разделяются и начнут двигаться в обратном направлении к своим электродам. Образуется электрический ток. Полученный сигнал затем усиливается в операционных усилителях (ОУ) и фильтруется. Количество заряда, получаемого от отдельных фотонов крайне мало, и снижение общего уровня шума позволяет схем использовать для обнаружения фотонов низкой энергии.

Обедненная область создается обратным смещением перехода, при котором через прибор течет слабый обратный ток. При обратном смещении электроны стремятся выйти из n -ой области во внешнюю цепь и образовать дырки в p -области, объединяя носители заряда область перехода. Если подать обратное напряжение, то область расширится, а, следовательно, чем больше путь, частиц, тем больше возможность взаимодействия. Данная структура используется в фотодиодах для того, чтобы получить как можно больше носителей заряда, как это возможно, на один фотон, оптимизируя чувствительность устройства.

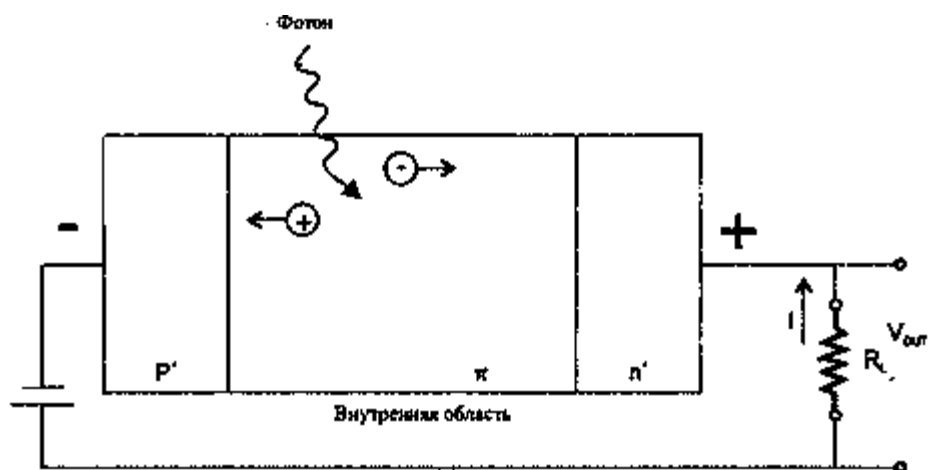


Рисунок 6 – Конструкция PIN - диода

Чаще всего n и p слой делают сильно легированными для осуществления так называемого омического контакта между металлом и полупроводником. В то же время i -слой является обедненным слоем, так как в нем нет свободных носителей заряда. На p - i - n - переход подают напряжение с обратным смещением. Сильно легированные слои станут проводящими. А слаболегированный слой, так как там нет носителей заряда, будет испытывать только поляризацию [17]

Ширина внутреннего слоя гарантирует, что высока вероятность поглощения входящих фотонов именно этим слоем, а не областями p - или n -типа. Внутренний слой имеет высокое сопротивление, поскольку в нем нет свободных носителей заряда. Это приводит к падению большей части напряжения на этот слой, и результирующее электрическое поле повышает скорость ответа и снижает шум.

Когда излучение с подходящей энергией попадает на внутренний слой, оно создает пару электрон-дырка, поднимая электрон из валентной зоны в зону проводимости и оставляя на его месте дырку. Под действием электрического поля, обусловленного напряжением смещения, приложенным к электродам носители заряда (электроны и дырки) быстро смещаются из переходной зоны, создавая ток, пропорциональный энергии падающего излучения.

Pin-диод является неэффективным, если излучение падает на сильно легированные слои n^+ и p^+ . При этом будет возникать диффузионный ток, который из-за большей инерционности ухудшает эффективность. По этой причине слои n^+ и p^+ нужно делать как можно тоньше, а i -слой обедненный слой – как можно больше, чтобы он поглощал все падающее излучение [2].

Pin-диоды изготавливаются из разных материалов. Для различных материалов различна длина волны излучения, при которой достигается максимальный эффект регистрации падающего излучения.

2.1 Рабочие параметры pin-диода

Длина волны – входящей частицы должно быть достаточно энергии для подъема электрона через запрещенную зону и создания пары электрон-дырка. У различных полупроводниковых материалов ширина запрещенной зоны различная, энергетический барьер в электрон-вольтах (эВ) может быть связан с длиной волны (λ) с помощью того же самого уравнения, как для светодиодов.

Для конкретного типа детектора энергетический барьер W есть величина постоянная, поэтому вышеприведенная формула дает максимальную длину волны, которая может быть зафиксирована, то есть длину волны отсечки.

Чувствительность ρ есть отношение выходного тока (i) детектора к входной оптической-мощности (P).

Для 800 нм чувствительность кремния около 0,5 А/Вт, а пиковая чувствительность InGaAs около 1,1 А/Вт для 1700 нм, снижаясь до 0,77 А/Вт для 1300 нм.

Спектральная характеристика показывает изменение чувствительности в зависимости от длины волны.

Скорость ответа детектора ограничена временем прохода, которое является временем преодоления свободными зарядами ширины внутреннего слоя. Это функция напряжения обратного смещения и физической ширины.

Для быстрых $p-i-n$ -диодов она колеблется от 1,5 до 10 нс. Емкость также влияет на ответ устройства, причем емкость перехода образует изолирующим внутренним слоем между электродами, образованными p - и n -областями. У высокоскоростных фотодиодов время ответа может достигать 10 пикосекунд при емкости в несколько пикофард с очень маленькими площадями поверхностей.

Вольтамперная характеристика.

Типичные вольтамперные ($I-U$) кривые для кремниевого $p-i-n$ -фотодиода показаны на рисунке 7. Можно видеть, что даже когда нет оптической мощности, течет небольшой обратный ток, который называется темновым током. Он вызывается температурным образованием свободных носителей зарядов, обычно удваиваясь через каждые 10°C прироста температуры после 25°C [16].

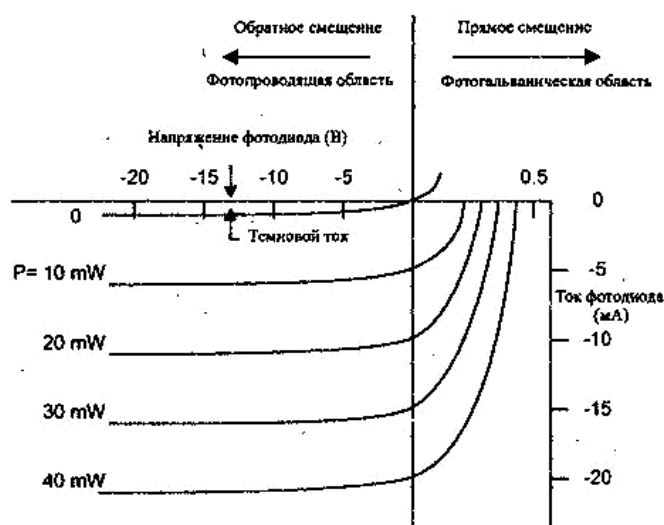


Рисунок 7 – Вольтамперные характеристики кремниевого $p-i-n$ - диода

2.2 $P-i-n$ -диод марки «BPW-34»

В качестве исследуемого диода в работе был выбран PIN – диод марки «BPW-34». Изображение представлено на рисунке 8.



Рисунок 8 – Внешний вид p-i-n- диода марки "BPW34"

Геометрические параметры представлены в приложение А.

Эффективная зона 7,5х7,5 мм, фабрикуется на 9х9 мм пластиковой подложке. Гамма излучение поступает с p-стороны и идет через полупроводниковую плоскость, за исключением поглощающей части около 300 мкм толщиной.

При регистрации излучения малой длительности необходимо применять внешний усилитель, шумы которого не позволяют зарегистрировать вспышку с числом фотонов менее 1000. Поэтому для спектрометра требуется подобрать схему усилителя. Основные характеристики BPW-34 указаны в таблице 1[2].

Таблица 1 – Базовые характеристики диода марки BPW.34

Характеристика	Значение
Размеры фотодиода (Ширина x ДлинaxВысота), мм	5,4x4,3x3,2
Размеры чувствительного слоя, мм	2,75x2,75x0,21
Рабочий диапазон температуры, °C	От -40 до 100
Подаваемое обратное напряжение, В	60
Площадь чувствительного слоя, мм ²	7,5
Длина волны пика чувствительности, нм	900
Диапазон применения, нм	От 430 до 1000

3 Моделирование PIN – диода.

Моделирование PIN – диода происходило в программе GEANT4. Для оценки работоспособности модели, проводился анализ спектров разных источников и эффективность регистрации детектора.

3.1 Описание основных составляющих параметров.

Чтобы начать моделирование в GEANT4, нужно в начале задать важные параметры так называемые классы, а именно:

- G4DetectorConstruction: в этом классе задается геометрия детектора;
- G4PhysicsList: в этом задаются частицы и взаимодействия в котором они участвуют;
- G4PrimaryGeneratorAction: в этом классе задаются первичные частицы, тут же задаются главные параметры: энергия, направления движения и т.д.

Также, обычно переопределяют так называемые UserAction-классы – это позволяет выполнять необходимые действия на некоторых этапах моделирования:

- G4UserRunAction: позволяет задать действия в начале/конце run-a. Обычно используют для того, чтобы открыть/закрыть файлы в которые будут сохраняться результаты моделирования;
- G4UserEventAction: позволяет задать действия в начале/конце event-a. Обычно используется для инициализации/сохранения гистограмм и первичного анализа;
- G4UserStackingAction: позволяет задать действия в момент появления вторичных частиц;

- **G4UserTrackingAction:** позволяет задать действия при начале/завершении движения частицы. Используют, например, для получения такой информации, как длина трека частицы;
- **G4UserSteppingAction:** позволяет задать действия выполняемые на каждом шаге движения частиц.

3.1.1 Создание геометрии модели

Как упоминалось выше геометрия модели создается в **DetectorConstruction**. Исходя из того что pin-диод состоит из корпуса и чувствительной области (таблица 1) то геометрия будет описывается в виде иерархии тел. Наибольшее тело называется «Мировым(World)» и содержит все остальные тела геометрии. Мировой объем так же называется материнским. Для создания компьютерной модели, необходимо задать параметры материнского объема, где и будет располагаться диод, назовем его «World», размеры которого будут соответствовать размерам корпуса :

```
G4double world_sizeX = 6,75 sizeX;
G4double world_sizeY = 6 sizeY;
G4double world_sizeZ = 2,75 sizeZ;
```

Далее с помощью функции **nist->FindOrBuildMaterial** задается материал «воздух», который выбирается из базы данных библиотеки . При этом будет произведена инициализация соответствующего материала в базе данных **GEANT4**. Форма «World» – параллелепипед.

```
G4Box* solidWorld =
new G4Box("World", //its
name
world_sizeX, world_sizeY, world_sizeZ); //its
size
```

Далее создается логический объем, где подключается материал, из которого сделан объем.

```

G4LogicalVolume* logicWorld =
    new G4LogicalVolume(solidWorld,          //its
solid
                        world_mat,          //its
material
                        "World");          //its name

```

Последний этап создания материнского объем — это создание физического объема. В данном объеме показан не только материал, но и информация о положении самого объекта в пространстве.

```

G4VPhysicalVolume* physWorld =
    ew G4PVPlacement(0,    //no rotation
G4ThreeVector(),        //at (0,0,0)
logicWorld,             //its logical volume
    "World",            //its name
    0,                  //its mother volume
false,                  //no Boolean

```

По умолчанию, любой физический объем, созданный из данного логического объема, при визуализации будет отображаться с использованием белого цвета. Для того чтобы объем при отображении был окрашен в другой цвет или чтобы он не отображался в Geant4, существуют параметры отображения G4VisAttributes.

```

Visualization attributes

G4VisAttributes* worldVisAtt =
    new G4VisAttributes(G4Colour(1.0,1.0,1.0));
//white

worldVisAtt->SetVisibility(true);

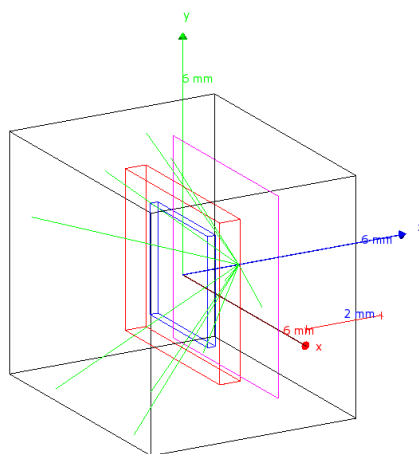
logicWorld->SetVisAttributes(worldVisAtt);

```

Следующий шаг является задать параметры корпуса, для этого создавался объем с размерами 4,5x4x0,55 мм обозначим его «Envelope». Размеры задаются следующим образом:

```
G4double env_sizeX = 4.5*mm;
G4double env_sizeY = 4*mm;
G4double env_sizeZ = 0.55*mm;
```

Так же необходимо задать материал корпуса- плексиглас. Чувствительная область так же, как и корпус и материнская область создается, задавая размер объема, материал, логический объем и физический объем. Для того чтобы защитить pin-диод от света добавляется защитный слой из алюминиевой фольги. Защитный слой создавался таким же путем, как и предыдущие. Программный код для создания компьютерной модели описан в приложении Б. Визуальная модель представлена на рисунке 9.



Serikbekova Z.K.

Рисунок 9 – Визуальная модель pin-диода

3.1.2 Физические процессы

В GEANT4 все используемые в моделировании физические процессы должны быть заранее подключены. Делается это в классе PhysicsList. В нем должны создаваться определения всех частиц и для каждой частицы должны выбираться процессы, которые с ней могут происходить. Он включает в себя следующие процессы: для фотонов:

- 1) фотоэффект;
- 2) комптоновское рассеяние;
- 3) рождение пар.

Для электронов, позитронов:

- 1) тормозное излучение;

- 2) многократное рассеяние;
- 3) аннигиляция.

Код класса `PhysicsList` находится в файлах `PhysicsList.hh` и `PhysicsList.cc`. Он совершенно стандартный, единственный параметр, который в нем может потребоваться изменить — это так называемый порог. Он задается в `PhysicsList.cc`:

```
PhysicsList::PhysicsList()  
: G4VUserPhysicsList()  
{  
    defaultCutValue = 0.05*mm;  
    SetVerboseLevel(1);}
```

Как видно, это величина с размерностью длины. Смысл ее таков: для каждого типа частиц — электронов, фотонов и т. д., — и для каждого материала вычисляется энергия, при которой эта величина совпадает со средним пробегом в данной среде. Затем, в ходе моделирования, если на некотором шаге должна родиться вторичная частица, но ее энергия меньше, чем пороговая энергия, то эта частица не рождается, а считается поглощенной в среде в данной точке. При этом ее энергия добавляется к `TotalEnergyDeposit`.

Программный код описан в приложении В.

3.1.3 Первичные частицы

Для моделирования первичной частицы используется класс `PrimaryGeneratorAction`. Данный класс отвечает за генерацию первичных частиц. Он устанавливает тип и энергию частиц, положение источника и направление вылета частиц. Этот метод вызывается в начале каждого события и частицы, сгенерированные этим методом проходят сквозь геометрию системы до тех пор, пока либо не потеряют всю энергию, либо вылетят за пределы мирового объема. Таким образом, каждый запуск программы моделирования представляет собой последовательную обработку набора, событий который показан на рисунке 10.

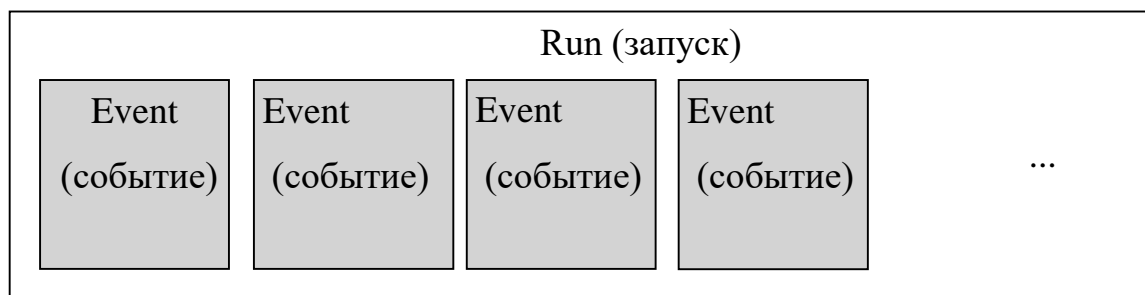


Рисунок 10 – Последовательность обработки события

Генерируется с помощью G4ParticleGun или G4GeneralParticleSource (GPS).

Главное отличие этих функции, состоит в том, что, G4ParticleGun – генерирует первичные частицы с одной энергией и движущихся в одном направлении. GPS позволяет пользователю контролировать следующие характеристики первичных частиц:

- Геометрия: на 2D или 3D поверхностях, таких как диски, сферы и коробки.
- Угловое распределение: однонаправленное, изотропное, косинусное или произвольное.
- Спектр: линейный, экспоненциальный, степенной, гауссовский.
- Источники: несколько независимых источников могут использоваться в одном и том же режиме.

Для pin-диода был выбран G4GeneralParticleSource, из-за его многофункциональности. Для этого в файле PrimaryGeneratorAction.cc создаем источник `fParticleGun = new G4GeneralParticleSource()`.

Далее в файле pin.in (Приложение Д) задаем характеристики источника, для Am^{241} .

3.2 Анализ результатов моделирования

3.2.1 Энергетические спектры

В результате моделирования диода были получены энергетические спектры с разными источниками. В таблице 2 представлены энергии и интенсивность источников.

Таблица 2 – Энергия и интенсивность источников

Источник	Энергия, кэВ	Интенсивность, %
^{137}Cs	31,817	2,11
	32,194	3,85
	36,304	0,368
	36,378	0,711
	37,255	0,225
^{179}Ta	54,611	13,818
	55,79	24,158
	63,2	8,093
	65	2,053
^{241}Am	13,9	12,5
	17,8	18
	20,8	4,7
	26,35	2,4
	59,54	35,9

Ниже приведены рассчитанные спектры для этих источников.

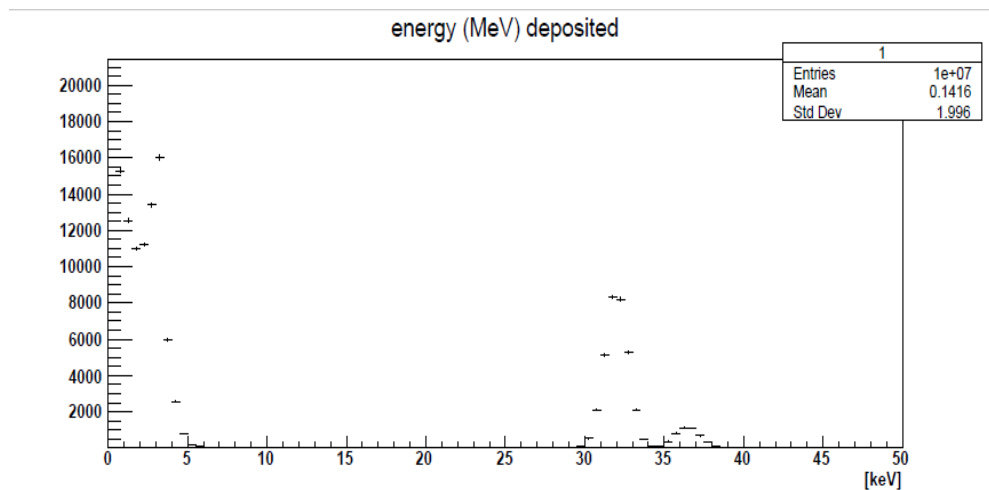


Рисунок 11 – Энергетический спектр Cs^{137} в линейном масштабе

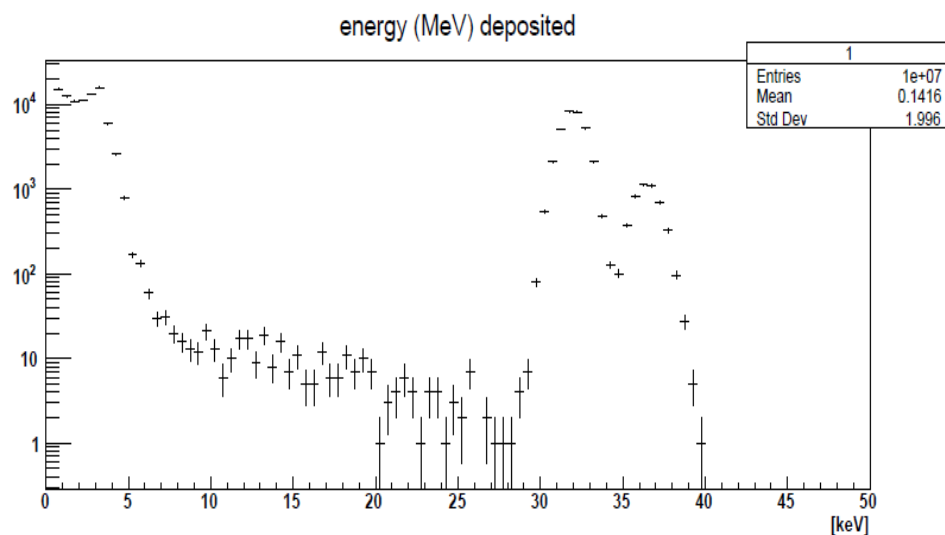


Рисунок 12– Энергетический спектр Cs^{137} в логарифмическом масштабе

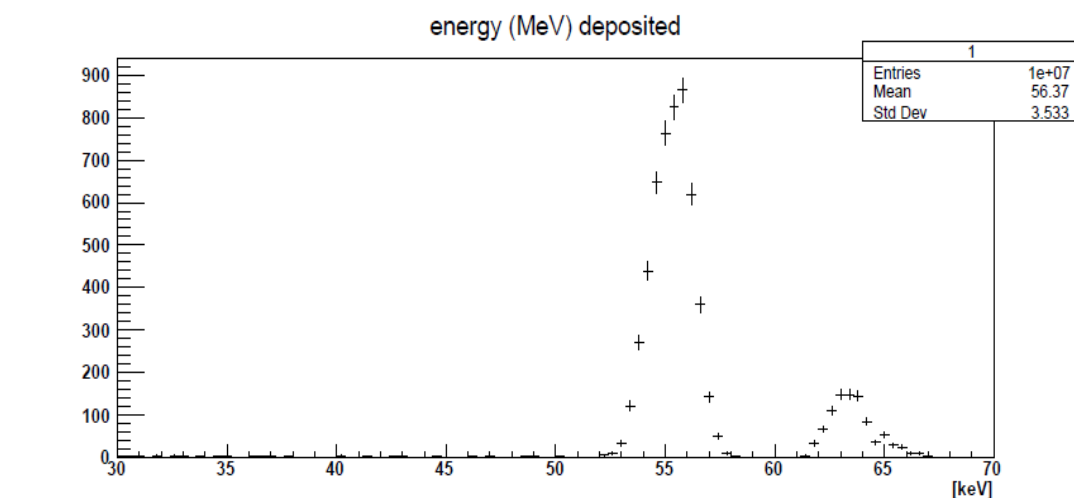


Рисунок 13 – Энергетический спектр Ta^{179} в линейном масштабе

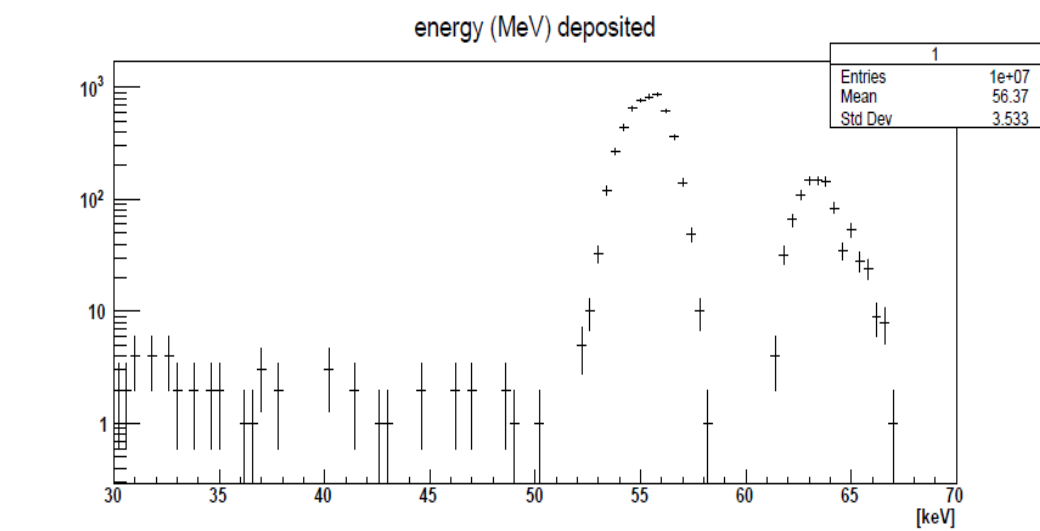


Рисунок 14 – Энергетический спектр Ta^{179} в логарифмическом масштабе

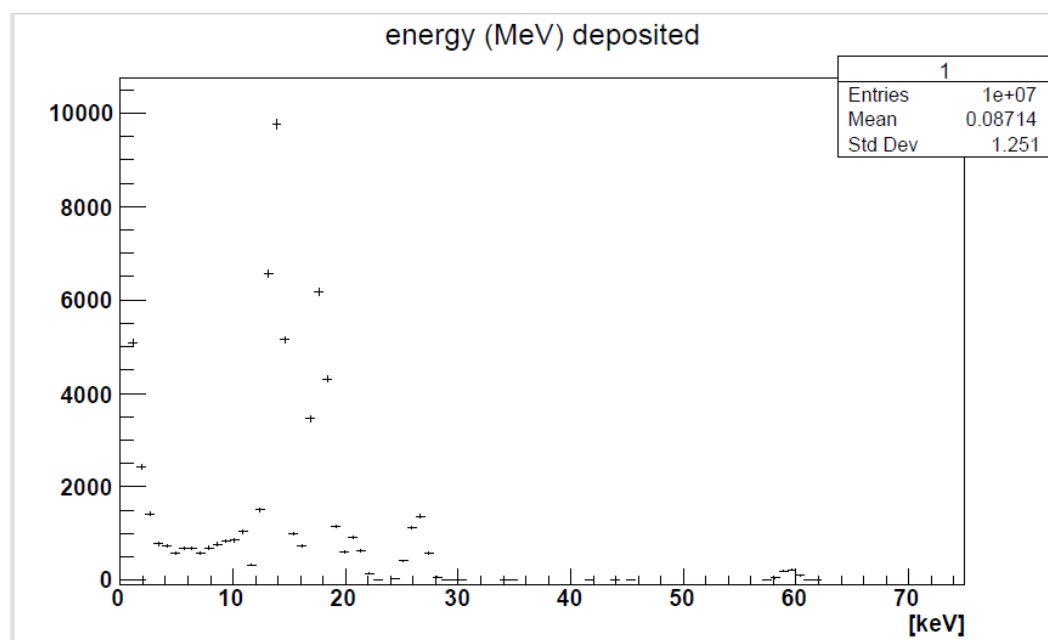


Рисунок 15 – Энергетический спектр Am^{241} в линейном масштабе

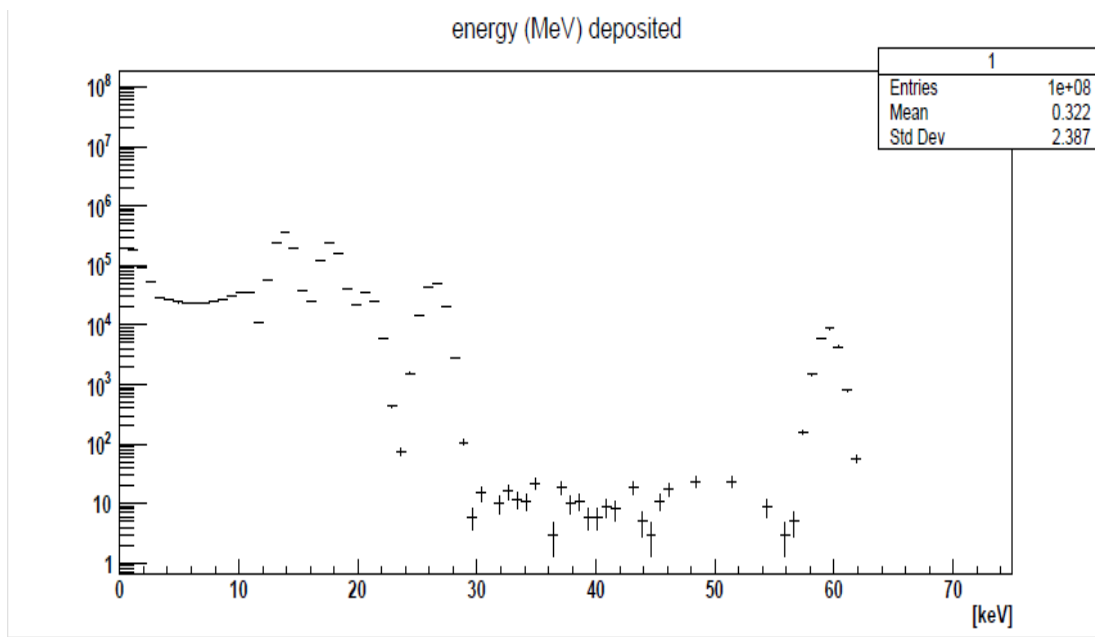


Рисунок 16 – Энергетический спектр Am^{241} в логарифмическом масштабе

Из рисунков 11-16 видны энергетические спектры, которые совпадают с табличными значениями (Таблица 2), что показывает точность спрограммированной модели.

3.2.2 Сравнение спектров

Ниже приведен спектр Am^{241} измеренный спектрометром на основе pin-диода «BPW-34»

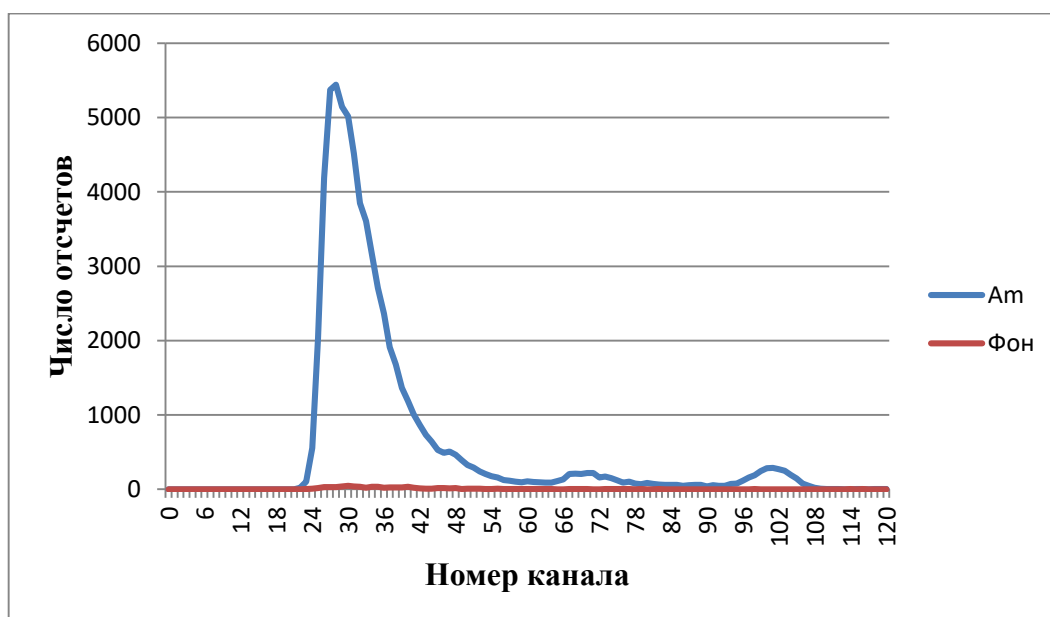


Рисунок 17 – Измеренный спектр Am^{241} в сравнении с фоном

Следует отметить что, данный спектрометр имеет очень маленькое значение фона.

С помощью калибровочной кривой (рисунок 18), значения спектров который были получены в GEANT4 были преобразованы, для сравнения с экспериментальными значениями.

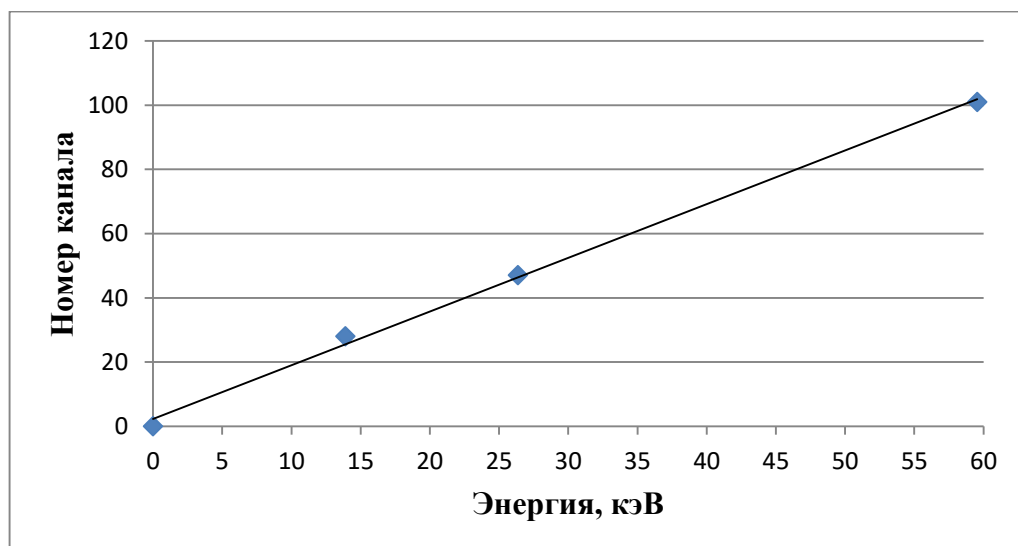


Рисунок 18 – Калибровочная кривая

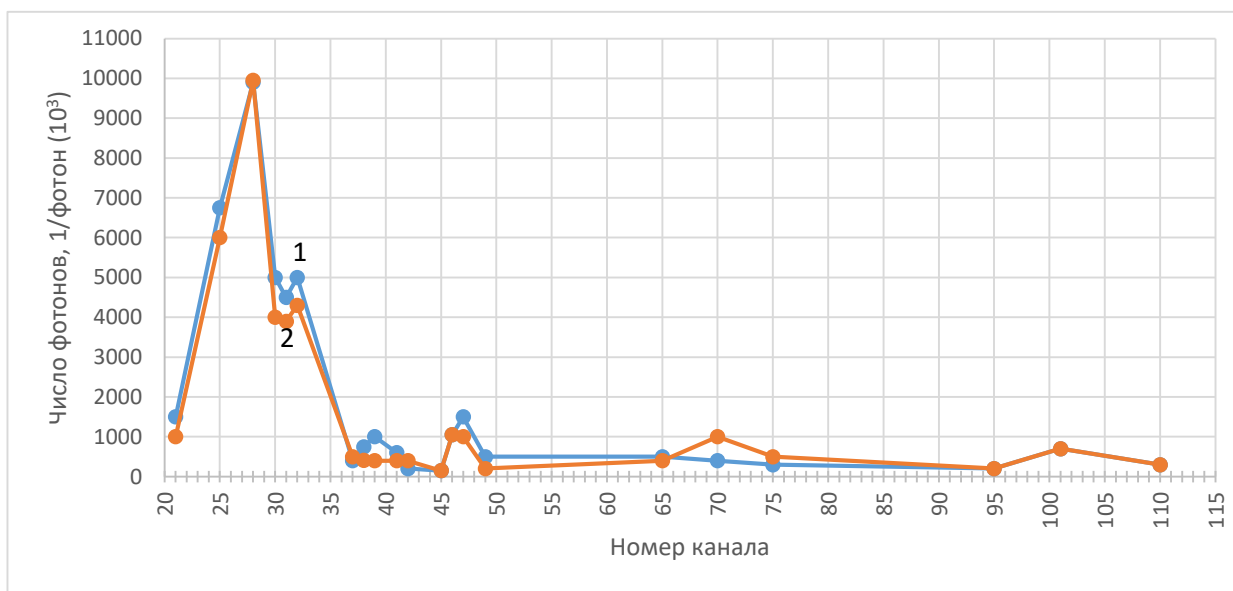


Рисунок 19 – Энергетический спектр Am²⁴¹

1 – рассчитанный; 2 – экспериментальный

Из рисунка 19 видно, энергия пика обратного рассеяния, вершина которого находится в 70 канале, и составила примерно 41 кэВ.

Экспериментальные значения показывают лишь 4 пика, а моделированный все 5 пиков, но пики спектров совпадают. Что говорит о правильности смоделированной программы.

3.2.3 Эффективность регистрации

Для проверки работоспособности модели произведен расчет эффективности рpn-диода. Эффективность – отношение попавших фотонов к числу зарегистрированных. Результаты расчета представлены на рисунке 20.

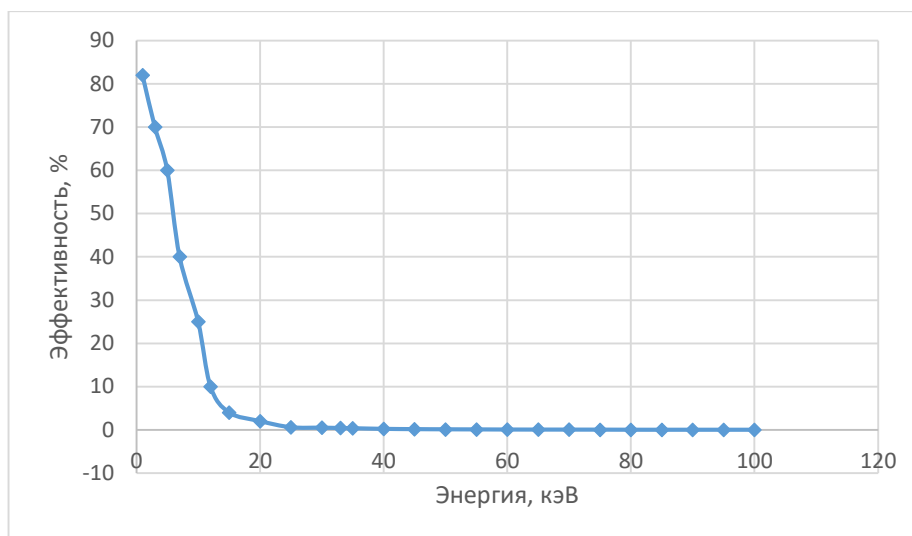


Рисунок 20 – Результаты расчета эффективности для рpn-диода

Из рисунка видно, что с увеличением энергией эффективность регистрации частиц падает, это обусловлено малой толщиной чувствительного слоя, то есть гамма-кванты не успевают отдать всю энергию.

Заключение

Для исследования возможности применения pin-диода спектрометрии, поставлен компьютерный эксперимент – численное моделирование методом Монте-Карло с помощью пакета GEANT4. Моделирование проводилось для источников гамма-излучения Am^{241} , Ta^{179} , Cs^{137} .

Были получены следующие результаты:

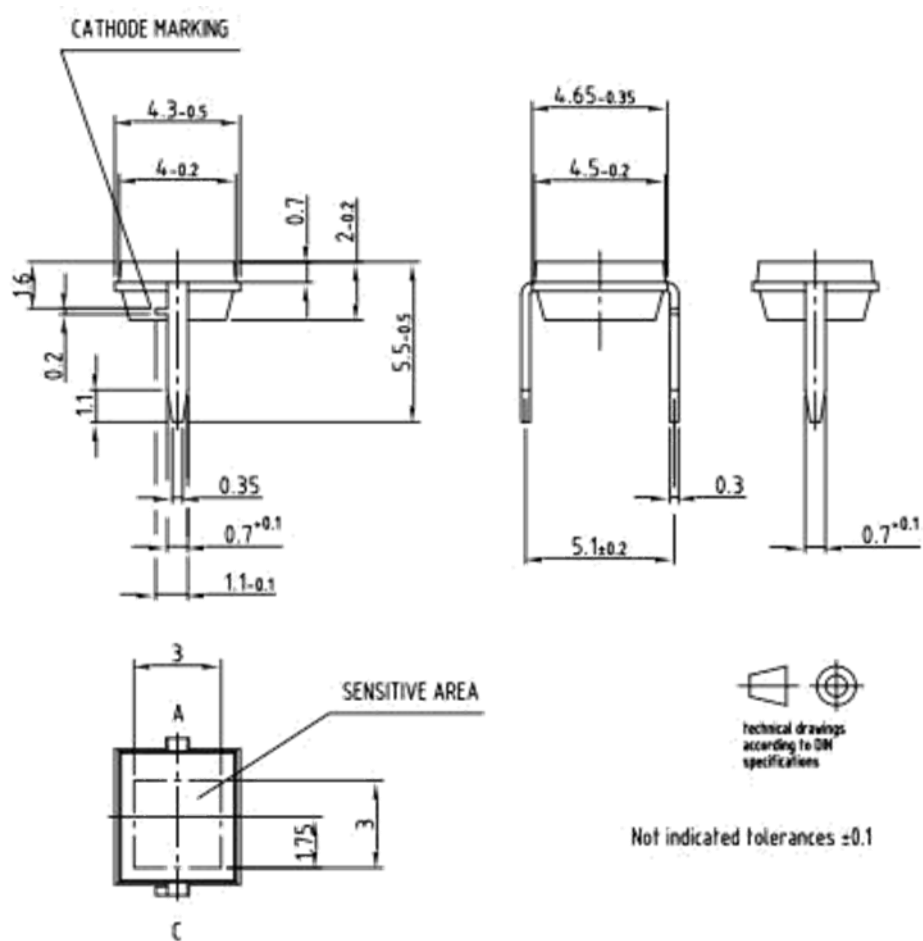
1. Смоделированные источники показали такие же энергетические спектры, что в табличных значениях
2. Рассчитан спектр для источника Am^{241} совпадает с измеренным.
3. Эффективность регистрации рентгеновского и гамма – излучения pin-диодом «BPW-34» уменьшается с увеличением энергии и при энергии 100 кэВ уже имеет значение несколько тысячных процента, из-за чего, диапазон энергии, который целесообразно измерять таким детектором, ограничен.
4. Основное преимущество PIN – диодов, для целей спектрометрии, помимо их дешевизны, является их малый размер.

Список использованных источников

1. Мухин К. Н. Экспериментальная ядерная физика: Учеб. для вузов. В 2 кн. Кн. 1. Физика атомного ядра. Ч. I. Свойства нуклонов, ядер и радиоактивных излучений.— 5-е изд., перераб. и доп.— М.: Энергоатомиздат, 1993.— 376 с.
2. «Волоконная оптика. Теория и практика» Дэвид Бейли, Эдвин Райт
3. W. M. C. Foulkes, L. Mitas, R. J. Needs and G. Rajagopal, Quantum Monte Carlo simulations of solids, reviews of Modern Physics 73 (2001) 33.
4. Rogers, D.W.O., Fifty years of Monte Carlo simulations for medical physics. Physics in Medicine and Biology, 2006. 51(13): p. R287-R301.
5. Amako, K., Present status of Geant4. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2000. 453(1-2): p. 455-460.
6. GEANT4//Geant4.web.cern.ch [Электронный доступ] – Режим доступа:<http://geant4.web.cern.ch/geant4/G4UsersDocuments/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/html/index.html>
7. Educated Guess Physics Lists for use cases involving hadronic Physics http://geant4.web.cern.ch/geant4/physics_lists/
8. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – С.73
9. Кукин П.П. Безопасность технологических процессов и производств: учеб. Пособие / П.П. Кукин, В.Л. Лапин – М., Высшая школа, 1999 – С.318.
10. Об основах охраны труда в Российской Федерации: Федеральный закон от 17 июля 1999 № 181 – ФЗ // Российская газ. – 1999 – 24.07. – С.4.

11. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы» [Текст]. – Взамен СанПиН 2.2.2.542-96; введ. 2003-06-30. – М: Российская газета, 2003 – С.3.
12. ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность [Текст]. – Введ. 1983-01-07. – М.: Издательство стандартов, 1988 – С.2.
13. СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений [Текст]. – Взамен СНиП 2.01.02-85; введ. 1998-01-01. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 1999 – С.6.
14. Г.Бете, Ю.Ашкин. Прохождение излучения через вещество. В кн.: Экспериментальная ядерная физика. Под ред. Э.Сегре. Т. 1, М., ИЛ, 1955, стр. 257-287
15. И.В. Савельев Курс общей физики, т.3, 2009 г
16. Дэвид Бейли, Эдвин Райт. Волоконная оптика: теория и практика/Пер. с англ. - М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2006. – С.320.
17. Болоздыня А.И. Экспериментальная ядерная физика Лекция 5 Взаимодействие заряженных частиц с веществом [Электронный ресурс]/Болоздыня А.И. – Режим доступа: <http://docplayer.ru/35177807-Eksperimentalnaya-yadernaya-fizika.html>
18. Мурзина Е.А. Взаимодействие излучения высокой энергии с веществом [Электронный ресурс]/Мурзина Е.А. – Режим доступа: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/ihem/ihem03.htm>

Приложение А



Приложение Б

```
// $Id: DetectorConstruction.cc 67268 2013-02-13
11:38:40Z ihrivnac $
//

//.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo000
00ooo.....ooo00000ooo.....
//.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo000
00ooo.....ooo00000ooo.....

#include "DetectorConstruction.hh"
#include "G4NistManager.hh"
#include "G4Material.hh"
#include "G4Tubs.hh"
#include "G4LogicalVolume.hh"
#include "G4PVPlacement.hh"
#include "G4SystemOfUnits.hh"
#include "G4Box.hh"
//.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo000
00ooo.....ooo00000ooo.....

DetectorConstruction::DetectorConstruction()
:G4VUserDetectorConstruction(),fScoringVolume(0)
{}

//.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo000
00ooo.....ooo00000ooo.....

DetectorConstruction::~~DetectorConstruction()
{}

//.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo000
00ooo.....ooo00000ooo.....

G4VPhysicalVolume*
DetectorConstruction::Construct()
{
    G4NistManager* nist = G4NistManager::Instance();

    G4bool checkOverlaps = true;
    //
    // Envelope (корпус)
    G4double env_sizeX = 4.5*mm;
```



```

        G4double env_sizeY = 4*mm;
        G4double env_sizeZ = 0.55*mm;
        G4Material* env_mat = nist-
>FindOrBuildMaterial("G4_PLEXIGLASS");
        G4Box* solidEnv = new G4Box("Envelope",
0.5*env_sizeX, 0.5*env_sizeY,
        0.5*env_sizeZ);

        G4LogicalVolume* logicEnv =
            new G4LogicalVolume(solidEnv, //its
solid
                                env_mat, //its
material
                                "Envelope"); //its
name

            new G4PVPlacement(0, //no
rotation
                                G4ThreeVector(), //at
(0,0,0)
                                logicEnv, //its
logical volume
                                "Envelope", //its
name
                                logicWorld, //its
mother volume
                                false, //no
boolean operation
                                0,
//copy number
                                checkOverlaps);
//overlaps checking

        // World (материнский объем)
        G4double world_sizeX = 1.5*env_sizeX;
        G4double world_sizeY = 1.5*env_sizeY;
        G4double world_sizeZ = 5*env_sizeZ;
        G4Material* world_mat = nist-
>FindOrBuildMaterial("G4_AIR");
        G4Box* solidWorld =
            new G4Box("World", //its
name
                        0.5*world_sizeX, 0.5*world_sizeY,
0.5*world_sizeZ); //its size

```

```

        G4LogicalVolume* logicWorld =
            new G4LogicalVolume(solidWorld,                //its
solid
                                world_mat,                //its
material
                                "World");                 //its
name

        G4VPhysicalVolume* physWorld =
            new G4PVPlacement(0,                            //no
rotation
                                G4ThreeVector(),           //at
(0,0,0)
                                logicWorld,                //its
logical volume
                                "World",                  //its
name
                                0,                          //its
mother volume
                                false,                     //no
boolean operation
                                0,
//copy number
                                checkOverlaps);
//overlaps checking
    // Shape (чувствительная область)
    //
    G4double s_sizeX = 2.75*mm;
    G4double s_sizeY = 2.75*mm;
    G4double s_sizeZ = 0.21*mm;
    G4Material* shape_mat = nist-
>FindOrBuildMaterial ("G4_Si");
    G4Box* solidshape = new G4Box("Shape",
0.5*s_sizeX,
    0.5*s_sizeY, 0.5*s_sizeZ);
    G4LogicalVolume* logicshape =
        new G4LogicalVolume(solidshape,
//its solid
                                shape_mat,
//its material
                                "Shape");                 //its
name

        new G4PVPlacement(0,                            //no
rotation

```

```

                                G4ThreeVector(),           //at
(0,0,0)
                                logicshape,
//its logical volume
                                "Shape",                   //its
name
                                logicWorld,                 //its
mother volume
                                false,                      //no
boolean operation
                                0,
//copy number

                                checkOverlaps);
//overlaps checking
    //cover (пластина)
        G4double c_sizeX = 5*mm;
        G4double c_sizeY = 5*mm;
        G4double c_sizeZ = 0.0001*mm;
        G4Material* cover_mat = nist-
>FindOrBuildMaterial ("G4_Al");
        G4Box* solidcover = new G4Box("cover",
0.5*c_sizeX,
        0.5*c_sizeY, 0.5*c_sizeZ);
        G4LogicalVolume* logiccover =
            new G4LogicalVolume(solidcover,
//its solid
                                cover_mat,
//its material
                                "cover");                 //its
name

        new G4PVPlacement(0,           //no
rotation
G4ThreeVector(0*mm,0*mm,1.15*mm),     //at (0,0,0)
                                logiccover,
//its logical volume
                                "cover",                   //its
name
                                logicWorld,                 //its
mother volume
                                false,                      //no
boolean operation

```

```

                                0,
//copy number
                                checkOverlaps);
//overlaps checking
    // Visualization attributes
    G4VisAttributes* worldVisAtt =
        new G4VisAttributes(G4Colour(1.0,1.0,1.0));
//white
    worldVisAtt->SetVisibility(true);
    logicWorld->SetVisAttributes(worldVisAtt);

    G4VisAttributes* worldVisAtt1 = new
G4VisAttributes(G4Colour(1.0,0.0,0.0)); //red
    worldVisAtt1->SetVisibility(true);
    logicEnv->SetVisAttributes(worldVisAtt1);

    G4VisAttributes* worldVisAtt2 = new
G4VisAttributes(G4Colour(0.0,0.0,1.0)); //blue
    worldVisAtt2->SetVisibility(true);
    logicshape->SetVisAttributes(worldVisAtt2);

    G4VisAttributes* worldVisAtt3 = new
G4VisAttributes(G4Colour(1.0,1.0,0.0)); //yellow
    worldVisAtt3->SetVisibility(true);
    logiccover->SetVisAttributes(worldVisAtt3);
    //Set Shape as scoring volume
    //
    //fScoringVolume = logicEnv;
    fScoringVolume = logicshape;
    //always return the physical World
    //
    return physWorld;
}

    //.....oooOOOOOooo.....oooOOOOOooo.....oooOOO
OOooo.....oooOOOOOooo.....

```

Приложение В

```
/// \brief Implementation of the PhysicsList class
//
//
// $Id: PhysicsList.cc 70314 2013-05-29 07:50:41Z
gcosmo $
//

//.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo000
00ooo.....ooo00000ooo.....
//.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo000
00ooo.....ooo00000ooo.....

#include "PhysicsList.hh"

#include "G4ParticleDefinition.hh"
#include "G4ProcessManager.hh"
#include "G4ParticleTypes.hh"
#include "G4ParticleTable.hh"

#include "G4SystemOfUnits.hh"

//.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo000
00ooo.....ooo00000ooo.....

PhysicsList::PhysicsList()
: G4VUserPhysicsList()
{
    defaultCutValue = 0.05*mm;
    SetVerboseLevel(1);
}

//.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo000
00ooo.....ooo00000ooo.....

PhysicsList::~~PhysicsList()
{}

//.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo000
00ooo.....ooo00000ooo.....

void PhysicsList::ConstructParticle()
{
```

```

        // In this method, static member functions
should be called
        // for all particles which you want to use.
        // This ensures that objects of these particle
types will be
        // created in the program.
        ConstructBosons();
        ConstructLeptons();
        ConstructHadrons();
        G4GenericIon::GenericIonDefinition();
    }

    //.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo000
00ooo.....ooo00000ooo.....

    void PhysicsList::ConstructBosons()
    {
        G4Gamma::GammaDefinition();
    }

    //.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo000
00ooo.....ooo00000ooo.....

    void PhysicsList::ConstructLeptons()
    {
        G4Electron::ElectronDefinition();
        G4Positron::PositronDefinition();
    }
    void PhysicsList::ConstructHadrons()
    {
        G4Alpha::AlphaDefinition();
    }

    //.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo000
00ooo.....ooo00000ooo.....

    void PhysicsList::ConstructProcess()
    {
        AddTransportation();
        ConstructEM();
        ConstructHadronic();
    }

    //.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo000
00ooo.....ooo00000ooo.....

```

```

#include "G4PhysicsListHelper.hh"

#include "G4ComptonScattering.hh"
#include "G4GammaConversion.hh"
#include "G4PhotoElectricEffect.hh"

#include "G4eMultipleScattering.hh"

#include "G4HadronElasticPhysicsHP.hh"
#include "G4IonBinaryCascadePhysics.hh"
#include "G4LossTableManager.hh"
#include "G4UnitsTable.hh"
#include "G4ProcessManager.hh"
#include "G4EmLivermorePhysics.hh"

#include "G4eIonisation.hh"
#include "G4eBremsstrahlung.hh"
#include "G4eplusAnnihilation.hh"
#include "G4HadronPhysicsQGSP_BERT.hh"
#include "G4HadronPhysicsQGSP_BIC.hh"
#include "G4HadronPhysicsQGSP_BERT_HP.hh"
#include "G4HadronPhysicsQGSP_BIC_HP.hh"
#include "G4HadronElasticPhysics.hh"
#include "G4HadronInelasticProcess.hh"
#include "G4EMDissociation.hh"
//.....oooOOOOOooo.....oooOOOOOooo.....oooOOO
OOooo.....oooOOOOOooo.....

void PhysicsList::ConstructEM()
{
    G4PhysicsListHelper*          ph          =
G4PhysicsListHelper::GetPhysicsListHelper();

    theParticleIterator->reset();
    while( (*theParticleIterator)() ){
        G4ParticleDefinition*      particle    =
theParticleIterator->value();
        G4String      particleName      =      particle-
>GetParticleName();

        if (particleName == "gamma") {

            ph->RegisterProcess(new
G4PhotoElectricEffect, particle);

```

```

        ph->RegisterProcess(new G4ComptonScattering,
particle);
        ph->RegisterProcess(new G4GammaConversion,
particle);

        } else if (particleName == "e-") {

            ph->RegisterProcess(new
G4eMultipleScattering, particle);
            ph->RegisterProcess(new G4eIonisation,
particle);
            ph->RegisterProcess(new G4eBremsstrahlung,
particle);

            } else if (particleName == "e+") {

                ph->RegisterProcess(new
G4eMultipleScattering, particle);
                ph->RegisterProcess(new G4eIonisation,
particle);
                ph->RegisterProcess(new G4eBremsstrahlung,
particle);
                ph->RegisterProcess(new G4eplusAnnihilation,
particle);
            }
        }
    }
    void PhysicsList::ConstructHadronic()
    {
        G4PhysicsListHelper* ph =
G4PhysicsListHelper::GetPhysicsListHelper();
        G4ParticleDefinition* particle =
G4Alpha::AlphaDefinition();
        ph->RegisterProcess(new
G4HadronElasticProcess(), particle);
        //ph->RegisterProcess(new
G4HadronInelasticProcess(), particle);
        G4HadronInelasticProcess* theIPGenericIon = new
G4HadronInelasticProcess("IonInelastic",
G4GenericIon::GenericIon() );
        // Cross Section Data Set
        G4EMDissociationCrossSection*
theEMDCrossSection = new
G4EMDissociationCrossSection;

```



```

        theIPGenericIon->AddDataSet( theEMDCrossSection
);
    // Model
    G4EMDissociation* theEMDModel = new
G4EMDissociation;
    theIPGenericIon->RegisterMe(theEMDModel);
    //Apply Processes to Process Manager of Neutron
    G4ProcessManager* pmanager = G4GenericIon::
GenericIon()->
    GetProcessManager();
    pmanager->AddDiscreteProcess( theIPGenericIon
);
}

//.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo000
00ooo.....ooo00000ooo.....

void PhysicsList::SetCuts()
{
    if (verboseLevel >0){
        G4cout << "PhysicsList::SetCuts:";
        G4cout << "CutLength : " << defaultCutValue/mm
<< " (mm)" << G4endl;
    }

    // set cut values for gamma at first and for e-
second and next for e+,
    // because some processes for e+/e- need cut
values for gamma
    SetCutValue(defaultCutValue, "gamma");
    SetCutValue(defaultCutValue, "e-");
    SetCutValue(defaultCutValue, "e+");
    SetCutValue(defaultCutValue, "Alpha");
}

//.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo000
00ooo.....ooo00000ooo.....

```

Приложение Д

```
/run/initialize
/gps/source/intensity 1
/gps/particle gamma
# square plane source
/gps/pos/type Point
/gps/position 0. 0. 1.5 mm
#/gps/pos/shape Square
#/gps/pos/centre 0. 0. -10. mm
#/gps/pos/halfx 1. mm
#/gps/pos/halfy 1. mm
/gps/ang/type cos
/gps/ene/type Gauss
/gps/ene/mono 13.9. keV
/gps/ene/sigma 0.7 keV

# beam #2
# 2x the intensity of beam #1
/gps/source/add 1.44
/gps/particle gamma
/gps/pos/type Point
/gps/position 0. 0. 1.5 mm
#/gps/pos/shape Square
#/gps/pos/centre 0. 0. -10. mm
#/gps/pos/halfx 1. mm
#/gps/pos/halfy 1. mm
/gps/ang/type cos
/gps/ene/type Gauss
/gps/ene/mono 17.8 keV
/gps/ene/sigma 0.7 keV

# beam #3
# 2x the intensity of beam #1
/gps/source/add 0.37
/gps/particle gamma
/gps/pos/type Point
/gps/position 0. 0. 1.5 mm
#/gps/pos/shape Square
#/gps/pos/centre 0. 0. -10. mm
#/gps/pos/halfx 1. mm
#/gps/pos/halfy 1. mm
/gps/ang/type cos
/gps/ene/type Gauss
```

```

/gps/ene/mono 20.8 keV
/gps/ene/sigma 0.7 keV

# beam #4
# 2x the intensity of beam #1
/gps/source/add 1.22
/gps/particle gamma
/gps/pos/type Point
/gps/position 0. 0. 1.5 mm
#/gps/pos/shape Square
#/gps/pos/centre 0. 0. -10. mm
#/gps/pos/halfx 1. mm
#/gps/pos/halfy 1. mm
/gps/ang/type cos
/gps/ene/type Gauss
/gps/ene/mono 26.4 keV
/gps/ene/sigma 0.7 keV

# beam #5
# 2x the intensity of beam #1
/gps/source/add 2.87
/gps/particle gamma
/gps/pos/type Point
/gps/position 0. 0. 1.5 mm
#/gps/pos/shape Square
#/gps/pos/centre 0. 0. -10. mm
#/gps/pos/halfx 1. mm
#/gps/pos/halfy 1. mm
/gps/ang/type cos
/gps/ene/type Gauss
/gps/ene/mono 59.54 keV
/gps/ene/sigma 0.7 keV
# commands below are independent of gps
#/analysis/setFileName test02
/analysis/h1/set 1 100 0 75. keV
#
/run/printProgress 10000
#
/run/beamOn 10000000

```